



**Modélisation : Des micro-algues numériques par Olivier Bernard et Antoine Sciandra. Entre complexité des modèles et fiabilité, entretien avec James Orr, propos recueillis par Dominique Chouchan.**

Olivier Bernard, Antoine Sciandra, James Orr

► **To cite this version:**

Olivier Bernard, Antoine Sciandra, James Orr. Modélisation : Des micro-algues numériques par Olivier Bernard et Antoine Sciandra. Entre complexité des modèles et fiabilité, entretien avec James Orr, propos recueillis par Dominique Chouchan.. Les Cahiers de l'INRIA - La Recherche, 2008, L' eau, 421 juillet/août 2008. inria-00546786

**HAL Id: inria-00546786**

**<https://inria.hal.science/inria-00546786>**

Submitted on 14 Dec 2010

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## MODÉLISATION

# Des micro-algues numériques

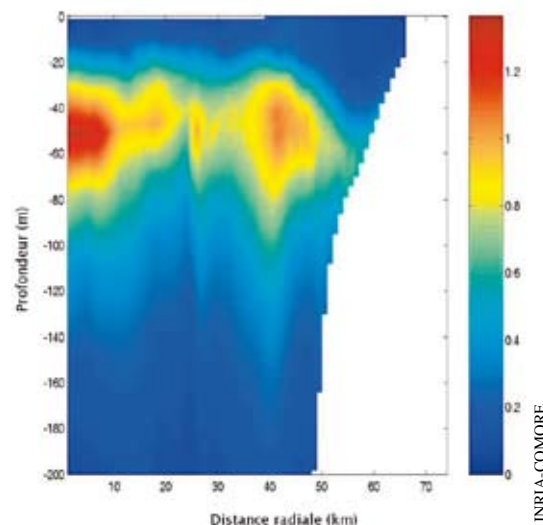
**Les modèles de croissance du phytoplancton devraient non seulement permettre d'accroître la précision des modèles climatiques, mais aussi d'optimiser le potentiel de production de biocarburant par ces micro-algues.**

Le phytoplancton prospère dans la couche superficielle de l'océan, là où le rayonnement solaire est propice à une activité photosynthétique (couche dite euphotique de quelques dizaines de mètres): ces micro-algues unicellulaires, d'un diamètre de l'ordre de la dizaine de micromètres, fixent le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ). Bien que représentant 1 % à peine de la biomasse photosynthétique planétaire, elles contribueraient à hauteur de 50 % à la fixation totale par cette dernière du  $\text{CO}_2$  atmosphérique<sup>(1)</sup>. C'est dire leur rôle déterminant dans le bilan global de l'absorption de ce gaz à effet de serre par l'océan. Pour étudier leur évolution et quantifier les flux de carbone en jeu, les modèles numériques sommaires des années 1980 laissent désormais la place à des modèles dynamiques aptes à rendre compte des interactions, fortement non linéaires, entre processus biologiques et hydrodynamiques.

La production primaire du phytoplancton (donc le  $\text{CO}_2$  total qu'il assimile) est actuellement estimée à l'échelle des bassins océaniques à l'aide de modèles empiriques, avec comme données d'entrée les estimations satellitaires de la concentration en chlorophylle et l'éclairement de surface<sup>(2)</sup> (flux de photons). À une échelle plus petite, de l'ordre de la centaine de kilomètres (mésos-échelle), une autre approche consiste à coupler modèles biologiques et hydrodynamiques, ces derniers fournissant alors les valeurs d'entrées (température, salinité, sels

nutritifs, rayonnement) aux modèles de croissance phytoplanctoniques<sup>(2)</sup>. Mais les modèles biologiques ont généralement été conçus sur la base d'expériences de laboratoire peu représentatives des situations naturelles. En particulier, ils ne tiennent pas compte de la réponse dynamique des micro-algues à un environnement turbulent tel que le milieu marin.

Pour remédier à cette lacune, nous avons développé un simulateur expérimental d'environnement marin piloté par ordinateur (SEMPO), dans le cadre d'une collaboration entre le Laboratoire d'océanographie de Villefranche-sur-Mer et l'INRIA. Ce dispositif reproduit

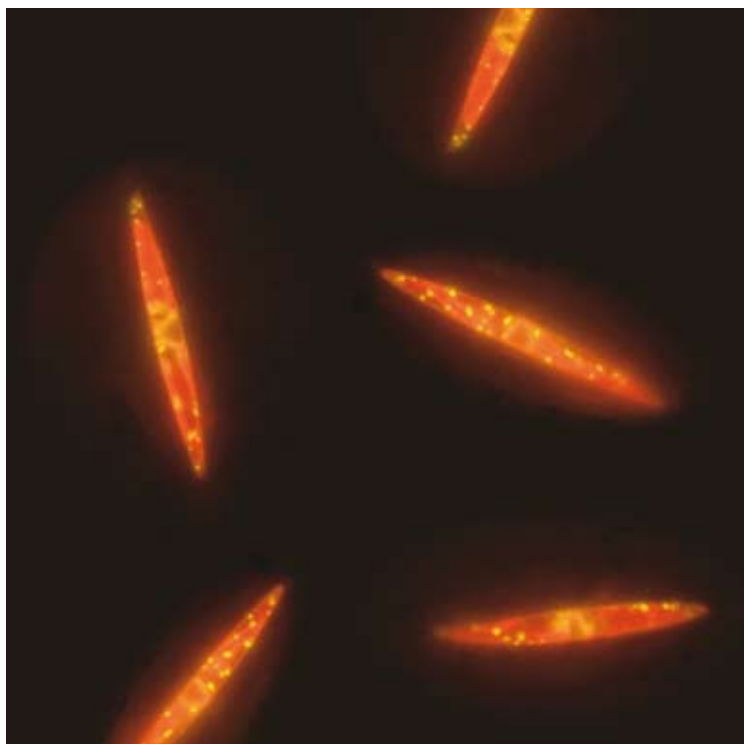


**Fig. 1 :** Visualisation du résultat d'une simulation obtenue par couplage entre le modèle de croissance phytoplanctonique (BioLov) et un modèle hydrodynamique du golfe du Lion (SYMPHONIE). La concentration en chlorophylle est mesurée en  $\text{mg} / \text{m}^3$ . Elle atteint son maximum entre 40 et 50 m de profondeur (rouge) et décroît avec la profondeur jusqu'à devenir nulle (bleu).

*in vitro* la variabilité temporelle des conditions lumineuses et nutritives que les cellules phytoplanctoniques rencontrent dans la couche euphotique. Son originalité tient en ce qu'il permet d'étudier avec précision les processus d'adaptation physiologiques nécessaires au maintien d'un bon équilibre entre milieux intra et extra-cellulaires (homéostasie) dans des conditions d'expérience proches des conditions réelles. Il fournit de la sorte des données

Fig. 2 : Sur ce cliché réalisé au Laboratoire de physiologie et biotechnologie des algues (Ifremer, Nantes), des micro-algues (diatomées *Pseudonitzschia calliantha*) observées au microscope. L'huile valorisable en biocarburant est colorée en jaune.

RAYMOND KAAS - IFREMER



fiables qui permettent de valider par des méthodes d'analyse formelle\* les modèles de croissance. Une avancée significative par rapport aux validations exclusivement fondées sur l'ajustement aux données, insuffisantes dans les problèmes complexes tels qu'ils se posent généralement en écologie.

L'outil SEMPO nous a par exemple permis de modéliser un phénomène *a priori* paradoxal, suggéré par des expériences antérieures<sup>(3)</sup>. De quoi s'agit-il ? Certaines espèces de micro-algues, comme les coccolithophoridées, se caractérisent par leur capacité à transformer en carbonate de calcium une part du carbone fixé par photosynthèse. Ce processus de calcification (recouvrement des cellules par de petits boucliers de calcite, les coccolithes) transforme durablement une fraction du carbone inorganique dissous dans l'eau de mer en carbone inorganique particulière : les falaises crayeuses d'Étretat sont le fruit d'une accumulation géologique de coccolithes (sur des fonds émergés depuis). Ce sont aussi elles qui donnent à la surface océanique son aspect laiteux tel qu'observé par satellite sur des zones de plusieurs centaines de kilomètres carrés. Or curieusement, une augmentation de la pression partielle de CO<sub>2</sub> (pCO<sub>2</sub>)\* semble réduire la calcification et non la stimuler.

### Les micro-algues pourraient fournir la matière première des agrocarburants de demain.

ront dans les échanges gazeux entre océan et atmosphère, à cause de la pression anthropique pour l'un, et de la réponse biologique pour l'autre, de tels modèles sont désormais seuls à même de prédire l'issue des rétroactions complexes entre modifications de la composition de l'atmosphère et modifications conséquentes de certains processus biologiques.

C'est également à ces modèles que nous recourons pour identifier les conditions optimales

de synthèse de certains composés phytoplanctoniques, comme les huiles. À cet égard, certaines espèces de micro-algues peuvent transformer en huile jusqu'à 80 % du CO<sub>2</sub> fixé par photosynthèse<sup>(5)</sup> (fig. 2). Leur croissance rapide laisse présager des rendements trente fois supérieurs à ceux des agrocarburants actuels (à base de colza ou de tournesol) et ce, sans porter

préjudice aux cultures vivrières. Les choses ne sont toutefois pas aussi simples : l'accumulation recherchée de lipides cellulaires est induite par un stress (généralement une carence en nitrate) qui affecte malheureusement la croissance de la population.

Dans le cadre du projet Shamash financé par le Programme national de recherche sur les bio-énergies (PNRB) et associant huit équipes, nous sommes précisément en train de valider un modèle numérique de la production d'huile.

<sup>(1)</sup> A. Morel, D. Antoine, *Science*, 296, p. 1980, 2002

<sup>(2)</sup> B. Faugeras et al., *Nonlinear Process Geophys* 11, p. 515, 2004

<sup>(3)</sup> U. Riebesell et al., *Nature*, 407, p. 364, 2000

<sup>(4)</sup> O. Bernard, A. Sciandra et S. Madani, *Ecol. Model.*, p. 324, 2008

<sup>(5)</sup> Y. Chisti, *Biotechnol Adv* 25, p. 294, 2007

<sup>(6)</sup> S. Planton, <http://intersticesinfo/climat>, 2007

Ce dernier permet, en utilisant des techniques de contrôle optimal, de caractériser les stress optimaux à appliquer et de réduire considérablement le nombre d'expériences coûteuses au profit de simulations par ordinateur. Le modèle calcule notamment, en fonction de l'état des algues, la durée et l'intensité des stress à appliquer aux cellules pour les maintenir dans des états de production optimale, même s'ils sont transitoires. Un autre exemple d'optimisation obtenue à l'aide de modèles de ce type concerne la conception des photobioréacteurs, par exemple de ceux destinés, entre autres, à produire des composés à base d'algues dans les industries agroalimentaire et cosmétique (voir l'encadré).

L'étude de la réponse des écosystèmes aux changements climatiques<sup>(6)</sup>, notamment des écosystèmes marins, sollicite de plus en plus des collaborations pluridisciplinaires, entre

biologistes, mathématiciens et modélisateurs. C'est dans le même esprit que nous nous sommes engagés, au début de cette année, dans le projet national REMECCA\* (Réponse de la Méditerranée aux changements climatiques et anthropiques). L'un de ses objectifs est de mieux comprendre les effets des modifications du milieu océanique, par exemple son réchauffement et son acidification, sur les populations planctoniques.

**Olivier Bernard**, directeur de recherche à l'INRIA (équipe-projet COMORE), coordonne le projet Shamash financé par le Programme national de recherche sur les bioénergies (PNRB).

**Antoine Sciandra**, directeur de recherche CNRS, est responsable de l'équipe « Dynamique du plancton marin », au sein du Laboratoire d'océanographie de Villefranche-sur-Mer. Il est associé au projet COMORE (INRIA) depuis 15 ans.

## PHOTOBIORÉACTEURS ET BIOÉNERGIES



GEPEA - B. DEGRENE

L'ingénierie des photobioréacteurs concerne de nombreux secteurs: la production de biomasse pour l'aquaculture ou de pigments pour les industries cosmétique et agroalimentaire, mais aussi celle d'hydrogène ou de lipides destinés à fournir des biocarburants. Ces instruments permettent de contrôler, en milieu clos, les réactions biologiques de micro-organismes photosynthétiques soumis à une énergie lumineuse. L'enjeu est d'optimiser leur géométrie et de mettre au point ce contrôle, qui porte sur les paramètres d'éclairement, les paramètres hydrodynamiques du milieu de culture des micro-organismes et les nutriments à apporter. Dans le cadre du projet Shamash, les chercheurs de l'INRIA et du laboratoire d'océanographie de Villefranche développent un modèle spécifique des méca-

nismes de production de lipides dans les micro-algues: ils travaillent à l'échelle de la cellule. Dans notre équipe, nous mettons au point des modèles d'extrapolation de cette production à l'échelle du procédé, ce qui suppose de modéliser très finement l'hydrodynamique du milieu et l'absorption de la lumière par ces micro-algues. Nous intégrons ensuite leur modèle dans les nôtres et nous les validons sur des prototypes (d'une centaine de litres). L'étape suivante consiste à définir des systèmes de production de masse à vocation industrielle (plusieurs dizaines de mètres-cubes). Jérémy Pruvost

Maître de conférences, spécialiste de l'ingénierie des photobioréacteurs au laboratoire Génie des procédés-Environnement-Agroalimentaire (GEPEA, Nantes), Jérémy Pruvost participe notamment au projet Shamash et coordonne le projet Biosolis (ANR) sur le développement de photobioréacteurs solaires pour la production de bioénergies.

\* Les méthodes formelles consistent, dans ce cas précis, à prouver sur la base de raisonnements mathématiques que le modèle reproduit les propriétés essentielles du système biologique, indépendamment de la valeur de ses paramètres.

\* La pression partielle de  $\text{CO}_2$  ( $p\text{CO}_2$ ) est la part de la pression due au  $\text{CO}_2$  contenu dans l'eau de mer.

\* Dans l'eau de mer, le système des carbonates, autrement dit la totalité du carbone inorganique dissous, comprend trois formes: dioxyde de carbone, ions carbonates ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) et ions bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ).

\* REMECCA associe la fondation Total et les laboratoires marins de la façade Provence-Alpes-Côte d'Azur





D.R.

L'océan est tout sauf une masse d'eau inerte. La modélisation de sa réponse à l'augmentation des émissions de CO<sub>2</sub> sollicite physiciens, chimistes, biologistes...

Océanographe et biogéochimiste, **James Orr**, américain d'origine, a intégré le Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE) du CEA en 1992 après quatre ans d'études post-doctorales à l'université de Princeton. Il est aujourd'hui détaché au Laboratoire de l'environnement marin (Monaco) de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA).

**Comment l'absorption du CO<sub>2</sub> atmosphérique par le phytoplancton est-elle prise en compte dans les modèles climatiques globaux ?**

**James Orr :** L'océan contient naturellement 50 fois plus de CO<sub>2</sub> que l'atmosphère, en raison d'une combinaison de processus. Bien sûr le phytoplancton joue un rôle important, au travers de la photosynthèse puis de la chaîne alimentaire.

## Entretien avec James Orr Entre complexité des modèles et fiabilité

Mais le piégeage du CO<sub>2</sub> par l'océan résulte pour une grande part de sa chimie, de sa circulation et de ses basses températures en haute latitude. Ces facteurs physicochimiques expliquent pourquoi l'absorption du CO<sub>2</sub> par l'océan augmente sous l'effet d'une augmentation des émissions anthropiques. La croissance du phytoplancton est en revanche limitée par l'apport des nutriments (phosphates, nitrates, fer...) et cet apport ne changera que si la circulation océanique elle-même change. Cela dit, certains modèles climatiques globaux prennent aussi en compte le cycle du carbone, donc la biogéochimie et un écosystème très simplifié : le cycle du carbone est alors modélisé en intégrant deux ou trois espèces de phytoplancton et de zooplancton (les plus répandues), avec les contraintes associées (disponibilité des nutriments, éclaircissement, température...).

**À terme, envisage-t-on d'intégrer des modèles plus fins de croissance phytoplanctonique ?**

**J. O. :** L'un des enjeux des modèles climatiques globaux est leur efficacité : on ne peut les complexifier à l'infini. Plus un modèle climatique est complexe, plus il est difficile de comprendre son comportement. En l'état actuel des connaissances, on ne connaît pas le niveau de complexité requis pour prévoir par exemple le climat et ses conséquences à l'horizon 2100. Par ailleurs, on ne dispose pas pour l'instant de suffisamment de données biologiques et biogéochimiques réparties sur l'océan mondial pour contraindre et valider des modèles plus complexes, du moins à l'échelle globale.

**Vous-même travaillez plus particulièrement sur l'acidification de l'océan. Où en est-on, notamment en termes d'impact sur les écosystèmes ?**

**J. O. :** La publication pionnière à ce sujet date d'une dizaine d'années et les recherches se sont intensifiées depuis quatre ans. On a montré que l'augmentation de CO<sub>2</sub> avait un effet néfaste sur les coraux, via une baisse du pH\* et du niveau de carbonates dans l'eau (augmentation du CO<sub>2</sub> dissous) qui inhibe la calcification de ces organismes. Pour le phytoplancton, c'est plus complexe et controversé. Une étude récente (*Science*, vol. 320, 18 avril 2008) vient par exemple de suggérer qu'une augmentation de CO<sub>2</sub> favoriserait la cal-

\* Le pH mesure l'acidité (ou la basicité) d'un liquide. Le pH d'une solution acide est inférieur au pH neutre (celui de l'eau pure soit 7), celui d'une solution basique supérieur au pH neutre.

\* Le programme EPOCA, qui a démarré en 2008, porte sur l'acidification des océans et ses conséquences sur les écosystèmes.

cification de certaines espèces de micro-algues fabriquant du calcaire, appelées coccolithophoridés, contrairement aux résultats antérieurs. Mais ce travail ne permet pas de récuser les études d'autres organismes, ni les changements chimiques de l'océan. Si le niveau de carbonates baisse en dessous d'un certain seuil, l'eau en vient à exercer une action corrosive sur le carbonate de calcium. Elle peut donc attaquer les coquillages de certaines espèces et risque ainsi de modifier les écosystèmes. À ce jour, les problèmes restent néanmoins ouverts tant ils sont complexes. C'est la raison pour laquelle l'Europe finance un nouveau programme sur cette thématique (EPOCA)\*. De même qu'en octobre de cette année, nous organisons une rencontre internationale, à Monaco, pour confronter les avancées en la matière.

**Propos recueillis par Dominique Chouchan**